

COMPLEMENTARITE DE LA MODELISATION PHYSIQUE ET NUMERIQUE A L'EXEMPLE D'UN AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE

Complementarity of physical and numerical modeling using the example of a run-of-river hydropower plant

Martin Bieri, Michael Müller, Juliano Ribeiro Martins, Jean-Louis Boillat

Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

EPFL-ENAC-IIC-LCH, Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse

Tél: +41 (0)21 693 23 66, Fax: +41 (0)21 693 22 64,

e-mail: martin.bieri@epfl.ch, michael.mueller@epfl.ch, juliano.ribeiro@epfl.ch, jean-louis.boillat@epfl.ch

Comme beaucoup d'aménagements hydroélectriques au fil de l'eau, celui de Lavey sur le Rhône en Suisse est affecté de manière récurrente par l'alluvionnement de sa retenue. Outre la gestion sédimentaire, les thèmes abordés par la modélisation concernent également la capacité de transit des crues au droit du barrage, les écoulements d'approche de la prise d'eau et l'optimisation des consignes d'exploitation de l'aménagement. Les niveaux d'eau, les vitesses et directions d'écoulement, la répartition du débit dans les pertuis, les processus d'alluvionnement et de purge sont ainsi analysés selon une approche stratégique qui s'appuie sur la complémentarité des modélisations numériques et physique. L'approche numérique à degré de complexité croissant est particulièrement intéressante pour la documentation des écoulements à large échelle et pour l'étude préalable des variantes d'aménagement. La simulation du transport sédimentaire confirme cependant l'avantage de la modélisation physique. Cette étude de cas conclut à la complémentarité des modélisations numériques et physique, en soulignant l'importance du calage sur les observations et mesures in situ. Une approche stratégique est finalement proposée pour le choix du ou des modèle(s) adéquat(s), basée sur des critères d'échelle et de problème à examiner.

As several of other run-of-river hydropower plants, the hydraulic scheme of Lavey on the Rhone River in Switzerland is concerned by continuous reservoir sedimentation. The domain of interest of the modeling is the appropriate sediment management, the flood evacuation capacity of the weir, the approach flow of the water intake as well as the exploitation rules of the plant. Water levels, flow velocities and directions, flow distribution between the entries of the water intake, sediment deposition and flushing were analysed by a strategic approach based on the complementarity of numerical and physical modeling. The numerical simulation with increasing complexity level is particularly interesting for large scale flow analysis as well as pre-evaluation of alternatives. The simulation of sediment transport phenomenon confirms the utility of the physical model. This case study confirms the pertinence of the hybrid modeling approach based on a calibration using in situ observations and measures. A strategic approach is finally given for choosing the adequate model(s), based on criteria of scale and phenomenon.

I INTRODUCTION

Le développement des modèles numériques est une activité en plein essor qui débouche sur une augmentation constante de l'offre dans les différents domaines d'ingénierie. En hydraulique, bon nombre de problèmes peuvent ainsi être résolus à l'aide de logiciels spécifiques. Dans l'état actuel de cette évolution, tous les phénomènes ne peuvent cependant être maîtrisés par le calcul, laissant encore une large place à la simulation physique sur modèles réduits.

Comme beaucoup d'aménagements hydroélectriques au fil de l'eau, celui de Lavey sur le Rhône en Suisse est affecté de manière récurrente par l'alluvionnement de sa retenue. La gestion sédimentaire du site constitue de ce fait l'objectif prioritaire de la présente étude. Les autres thèmes abordés par la modélisation concernent la capacité de transit des crues au droit du barrage, les écoulements d'approche de la prise d'eau et l'optimisation des consignes d'exploitation de l'aménagement. Les niveaux d'eau, les vitesses et directions d'écoulement, la répartition du débit dans les pertuis, les processus d'alluvionnement et de purge sont ainsi analysés selon une approche stratégique qui s'appuie sur la complémentarité des modélisations numérique et physique:

- La condition limite aval de la zone d'étude, caractérisée par un régime d'écoulement fluvial, est calculée à l'aide du modèle 1D *HEC-RAS*, après calage sur les relations « niveau-débit » des stations limnimétriques du Rhône.

- L'analyse préalable des champs de vitesse sous différentes conditions d'exploitation est obtenue par le logiciel *Dunamic 2D*, qui résout les équations complètes de St-Venant par la méthode des volumes finis.
- La simulation du transport solide dans le secteur du barrage à l'aide du code numérique *CCHE 2D* a permis l'étude préliminaire de l'impact sédimentaire du réaménagement de la zone. La modélisation des processus d'alluvionnement est réalisée pour différentes consignes d'exploitation et en situation de purge.
- En raison de la complexité des écoulements à l'approche de la prise d'eau, la simulation numérique tridimensionnelle avec *FLOW3D*[®] s'est imposée pour l'étude comparative de variantes d'aménagement.
- Les différentes phases de modélisation numérique ont été exploitées pour faciliter l'optimisation du projet sur un modèle physique (1:40). Ce dernier a contribué avantageusement au développement d'une solution durable pour la gestion sédimentaire et à la validation du projet. Il a également été mis à profit pour définir les consignes d'exploitation du nouvel aménagement et s'est révélé comme un précieux outil de communication.

Cette étude de cas conclut à la complémentarité des modélisations numériques et physique, en soulignant l'importance du calage sur les observations et mesures in situ. Une approche stratégique est finalement proposée pour le choix du ou des modèle(s) adéquat(s), basée sur des critères d'échelle et de problème à examiner.

II PROBLÉMATIQUE

L'usine hydroélectrique de Lavey turbine le débit du Rhône capté au fil de l'eau près d'Evionnaz dans le canton du Valais en Suisse. Mis en service en 1949, cet aménagement est conçu de manière à gérer de fortes variations de débit. La retenue est créée par un barrage mobile, qui contrôle le niveau d'exploitation de la prise d'eau en rive droite du Rhône (Figure 1). Le barrage comporte trois passes, équipées chacune de deux vantaux dont le réglage permet d'assurer une alimentation optimale de la centrale et un transit sécuritaire des crues.

Lors d'un événement extrême en octobre 2000, la capacité hydraulique du Rhône a atteint sa limite au droit du barrage. Les profils en travers relevés dans le Rhône en amont ont permis de documenter l'importance de l'alluvionnement et la réduction de la capacité hydraulique de l'ouvrage. Suite à ce constat, la Ville de Lausanne, propriétaire et exploitant de l'aménagement de Lavey par son *service de l'électricité* (SEL), a mandaté un groupement d'ingénieurs constitué de *Stucky SA*, *Hydrocosmos SA* et *Bonnard & Gardel SA* pour élaborer des propositions d'amélioration. Afin de tester et optimiser la solution projetée, un modèle physique de l'aménagement a été réalisé au *Laboratoire de Constructions Hydrauliques* (LCH) de l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL). Dans une première phase expérimentale, les essais se sont concentrés sur l'état actuel de l'aménagement dans un but de calage et de validation du modèle, tant d'un point de vue purement hydraulique que sédimentaire [6, 7]. Cette étape préliminaire fait l'objet de la présente publication.

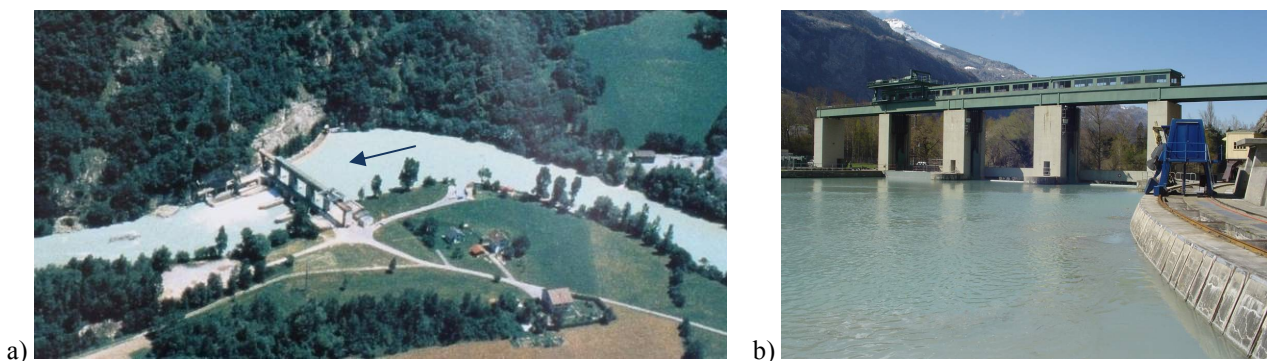


Figure 1: Photo aérienne a) et vue amont b) de l'aménagement au fil de l'eau de Lavey

Les essais se concentrent sur la capacité de transit des crues au droit du barrage et sur la répartition du débit entre les portails de la prise d'eau, avec et sans apport sédimentaire. Les mesures sont comparées aux observations faites sur le prototype ainsi qu'avec les résultats de la simulation numérique tridimensionnelle [5].

III CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE L'AMÉNAGEMENT

Le barrage de Lavey contrôle l'écoulement du Rhône pour former une retenue à niveau constant devant la prise d'eau de l'aménagement. Les doubles vantaux de chacune des trois passes du barrage peuvent être levés ou abaissés selon les conditions d'exploitation. Le radier des passes se trouve à 435 m s.m. et les ouvertures ont une largeur de 13 m.

La prise d'eau est implantée en rive droite, à l'extérieur de la courbe du Rhône. L'ouvrage est composé de deux trompes d'entrée, chacune divisée en deux portails de 14 m de largeur à l'orifice. Le seuil de la prise se trouve à 438 m s.m. et le bord supérieur des ouvertures à 443.5 m s.m., ce qui définit une hauteur d'entrée de 5.5 m. Une grille de 6 m de longueur permet d'éviter l'entrée de débris flottants (bois, déchets etc.) dans la prise. Elle est nettoyée par un dégrilleur automatique dès que la perte de charge aux portails dépasse la valeur de consigne.

En mode d'exploitation, le plan d'eau dans le bassin d'accumulation est maintenu à 446 m s.m. et la prise permet de soutirer un débit de turbinage jusqu'à $Q_{\text{prise}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$. En cas de crue (débit du Rhône $Q \geq 600 \text{ m}^3/\text{s}$), l'exploitation de la centrale est arrêtée et tout le débit doit pouvoir transiter par le barrage sans provoquer l'inondation de la zone amont. Dans une telle situation, les vantaux du barrage sont complètement ouverts, avec leur limite inférieure à 444.7 m s.m.

IV MODÉLISATION PHYSIQUE

IV.1 Caractéristiques du modèle

Le modèle physique est construit à l'échelle géométrique 1:40 et exploité en similitude de Froude. Il reproduit 500 m du Rhône, répartis sur 350 m à l'amont et 150 m à l'aval du barrage (Figure 2). L'approvisionnement en eau est assuré en circuit fermé et contrôlé par un débitmètre électromagnétique. Le niveau aval est contrôlé à l'aide d'un déversoir réglable, de manière à satisfaire la relation « niveau-débit » selon les simulations 2D du groupement d'ingénieurs. La topographie du Rhône et de ses rives est reproduite conformément à l'état relevé lors de la réalisation de l'aménagement en 1949. Le lit fixe est construit en croutage de ciment sur la base de profils en travers caractéristiques. Les ouvrages hydrauliques (barrage, prise d'eau et mur guideau) sont fabriqués en plastique PVC et implantés dans le modèle (Figure 3a).

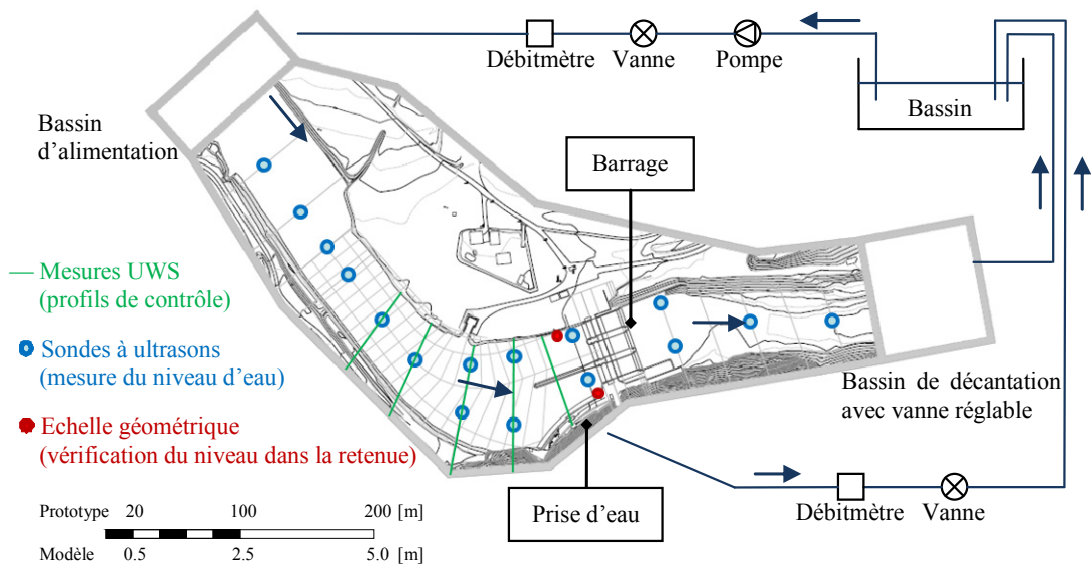


Figure 2: Géométrie, circuit d'alimentation et instrumentation du modèle physique du barrage de Lavey

Pendant les essais de charriage, un fond mobile de référence est reproduit sur le modèle. La masse sédimentaire est constituée de matériaux granulaires non cohésifs, caractérisés par un diamètre moyen et une masse volumique respectant le critère de Shields. A l'aval du modèle, les sédiments transportés sont récupérés dans un bassin de décantation.

IV.2 Instrumentation et principaux paramètres de mesure

Le niveau du plan d'eau est suivi par 16 sondes à ultrasons et vérifié par deux échelles limnimétriques installées sur le modèle. Des mesures de vitesse au micro-moulinet permettent de déterminer la répartition du débit entre les trois passes du barrage et à l'entrée des quatre portails de la prise d'eau. Les écoulements d'approche sont visualisés à l'aide d'un colorant traceur et les champs de vitesses superficielles par la méthode LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) [1, 5]. Au cours des essais de charriage l'évolution des dépôts sédimentaires est mesurée par un Mini Echo Sounder (UWS) [4], dont le capteur partiellement immergé permet de suivre le fond en continu sans interruption de l'essai.

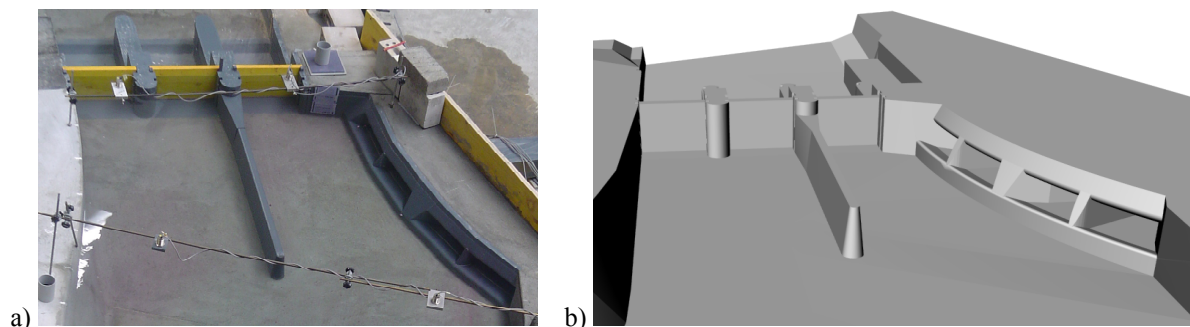


Figure 3: Barrage et prise d'eau sur a) modèle physique et b) modèle numérique 3D

V MODÉLISATION NUMÉRIQUE

V.1 Analyse préalable des champs de vitesses avec *Dunamic 2D*

La modélisation hydraulique bidimensionnelle du barrage de Lavey pour l'analyse préalable de la capacité du Rhône au droit du barrage et l'étude de variantes d'aménagement pour augmenter la capacité du barrage nécessite un modèle numérique permettant une analyse des vitesses d'écoulement et des hauteurs d'eau, tant en régime fluvial que torrentiel. Pour ce genre d'analyse *HydroCosmos SA* a développé le logiciel *Dunamic 2D* [2] qui résout les équations complètes de Saint-Venant par la méthode des volumes finis. Les plus récents développements de l'hydraulique numérique y sont intégrés. La base géométrique est un modèle numérique de terrain à mailles carrées. Une maille de 0.333 m a été choisie afin d'optimiser les temps de calcul d'une part et la précision des résultats d'autre part. Les pertes de charge sont calculées selon Bathurst. Une hauteur de rugosité équivalente de sable a été choisie pour chaque secteur du lit du Rhône.

La condition limite aval a été définie sur la base d'une modélisation *HEC-RAS* du Rhône à l'aval du barrage sur un tronçon à écoulement fluvial. Cependant, compte tenu de l'incohérence entre les résultats du modèle et des valeurs mesurées in situ, la limite aval du modèle bidimensionnel a été prolongée jusqu'à retrouver un tronçon à écoulement torrentiel. Dans cette situation, aucune condition limite aval ne doit être imposée. La condition de bord à l'entrée du modèle a été définie comme un débit uniformément réparti sur la largeur du Rhône. Les conditions initiales du tronçon d'étude correspondent à un lac au repos.

V.2 Simulation du transport solide avec *CCHE 2D*

La simulation du transport solide dans le secteur du barrage à l'aide du code numérique *CCHE 2D* [3] a permis l'étude préliminaire de l'impact du réaménagement de la zone. La modélisation des processus d'alluvionnement est réalisée pour différentes consignes d'exploitation et en situation de purge.

Le modèle hydraulique et sédimentologique *CCHE 2D* v2.210, développé par le *National Center for Computational and Engineering* de l'université du Mississippi, a été validé sur la base de mesures en laboratoire et sur de grandes rivières et fleuves (Mississippi, Vistule, East Fork). Il s'agit d'un modèle hydraulique à éléments finis et à fond mobile résolvant en deux dimensions les équations de Barré de Saint-Venant couplées à un module de calcul de transport solide (par charriage ou/et suspension). Ce modèle est appliqué au secteur du barrage.

La représentation des processus d'alluvionnement est réalisée dans différentes configurations de fonctionnement de l'ouvrage (mode d'exploitation, soutirage et purge rive droite et gauche) et à différentes gammes de débit. Le but du calage du transport solide consiste à représenter les processus de dépôt dans le

coude du Rhône situé à une centaine de mètres à l'amont de la prise d'eau de Lavey. La modélisation, effectuée par le groupement d'ingénieurs, a permis de représenter la situation en mode d'exploitation en période de hautes eaux, période durant laquelle les apports solides sont les plus importants.

V.3 Simulation numérique tridimensionnelle avec *FLOW3D*[®]

La complexité de l'écoulement en courbe et la disposition particulière des ouvrages hydrauliques ont encouragé l'approche complémentaire d'une modélisation numérique tridimensionnelle avec le logiciel *FLOW3D*[®]. Dans un premier temps, l'état initial sans dépôts de sédiments a été simulé pour les situations d'exploitation et de crues caractéristiques (Figure 3b). La situation alluvionnée a ensuite été modélisée. Les écoulements d'approche du barrage et de la prise d'eau ont été analysés et comparés aux résultats du modèle physique. La modélisation a été effectuée en tenant compte des forces de gravité (9.81 m/s^2), de viscosité (fluide Newtonien) et de turbulence (modèle "k-ε"). Les caractéristiques du fluide (densité et viscosité) sont celles de l'eau à 20 °C. Pour les simulations d'exploitation, le maillage autour des ouvrages est caractérisé par une grille de 0.5 m de hauteur pour 1.0 m de largeur et 1.0 m de longueur. Pour les simulations de crues, le maillage a été simplifié en augmentant la hauteur de 0.5 m à 1.0 m. Ces tailles de maillage ont été choisies de manière à satisfaire les critères de convergence pour assurer une solution finale stable, et aussi pour obtenir des temps de calcul raisonnables [8, 9]. Les conditions de bord ont été fixées selon les cas. Pour les situations d'exploitation, un débit entrant avec un niveau constant à l'amont (Volume flow rate), une vitesse à la sortie de la prise (Specified pressure) et un débit soutiré/déversé (Volume flow rate) ont été choisis. Pour les situations de crues, le débit caractéristique avec les niveaux d'eau amont et aval (Volume flow rate) correspondants ont été imposés.

VI RESULTATS

VI.1 Essais hydrauliques

VI.1.1 Essais de crue

Pour un débit $Q = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à la pointe de crue mesurée en octobre 2000, toutes les passes sont ouvertes. La simulation préalable avec *Dunamic 2D* (Figure 4a) a montré une ouverture centrale légèrement plus chargée. Ce phénomène a été retrouvé d'une manière plus prononcée sur modèle physique (Figure 4b). La passe de rive gauche est affectée par l'écoulement en courbe qui privilégie l'extérieur du coude et celle de rive droite est partiellement masquée par le mur guideau existant entre les passes 2 et 3. Cette répartition non uniforme du débit est également mise en évidence par la simulation numérique 3D (Figure 4c). La différence observée entre les résultats expérimentaux et numériques montre que, malgré la puissance du modèle 3D, l'écoulement en courbe et la présence d'obstacles génèrent des comportements tridimensionnels complexes qui ne sont pas parfaitement reproduits par les modèles numériques.

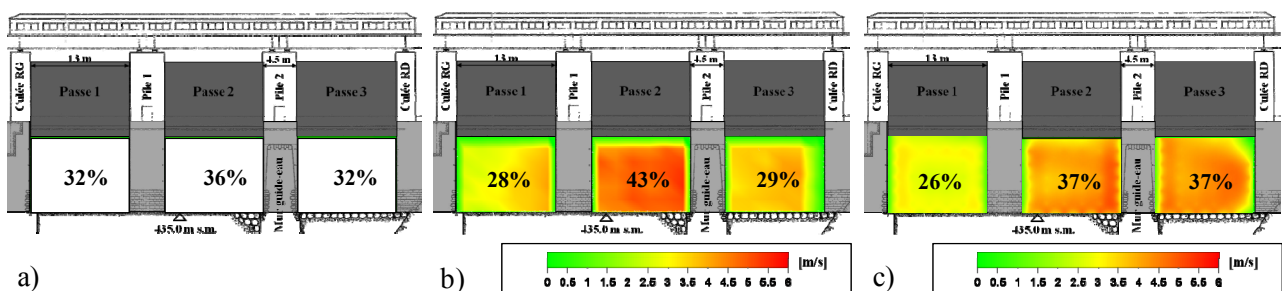


Figure 4: Vitesses d'écoulement [m/s] dans les pertuis des trois passes du barrage, $Q_{\text{Rhône}} = HQ_{\text{année 2000}} = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$; répartition du débit entre les passes simulée avec a) *Dunamic 2D*, b) sur modèle physique et c) avec *FLOW3D*[®].

L'augmentation du débit conduit à l'atténuation de l'influence du mur guideau et à une répartition plus uniforme entre les passes. Avec la diminution du débit, l'influence de ce mur devient significative pour toutes les configurations d'ouvertures. Dans tous les cas, la passe 2 reste la plus capacitive.

Les mesures de niveau montrent que l'inclinaison du plan d'eau, causée par l'écoulement en courbe à l'amont du barrage, conduit à une différence d'environ 0.5 à 0.7 m entre les deux rives. Cette différence a été retrouvée par tous les modèles.

VI.1.2 Essais d'exploitation

L'étude de répartition du débit à l'entrée de la prise d'eau, effectuée seulement sur modèle physique et numérique 3D, ne fait pas apparaître de différence significative entre la capacité des deux trompes. Selon les mesures sur modèle physique, les ouvertures amont de chaque trompe sont en revanche un peu mieux alimentées. Ce constat n'est toutefois pas confirmé par les résultats du modèle numérique (Figure 5).

Les vitesses maximales à la grille se situent autour de 1.2 m/s et restent dans une limite acceptable pour une prise d'eau en rivière. Néanmoins, dans la situation alluvionnée, les vitesses augmentent jusqu'à 1.35 m/s sous l'influence des dépôts sédimentaires qui réduisent la section d'écoulement. L'écoulement le plus rapide se rencontre à proximité du seuil inférieur de la prise, où les masses d'eau sont accélérées sur le fond de la retenue.

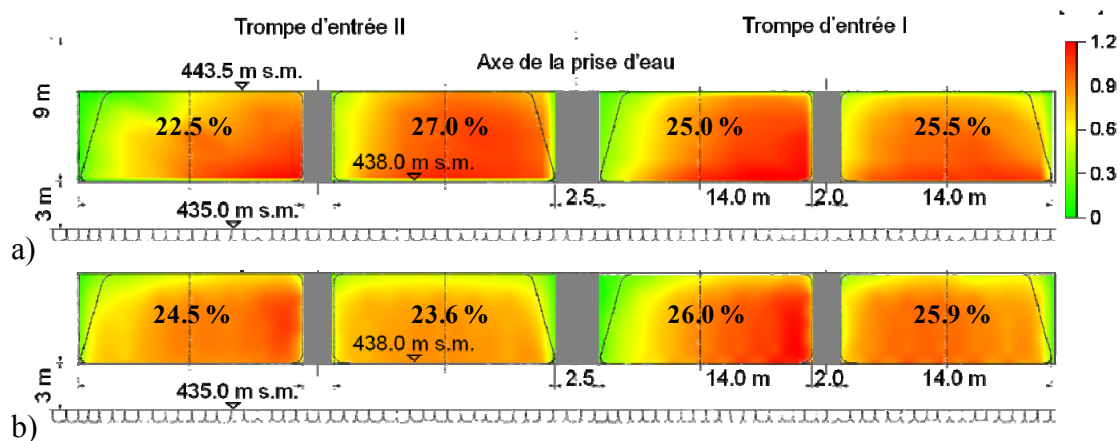


Figure 5: Répartition des vitesses à l'entrée de la prise, $Q_{\text{Rhône}} = Q_{\text{prise}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$; résultat de la modélisation a) physique et b) numérique avec *FLOW3D*®

En exploitation normale, le niveau dans la retenue est maintenu constant à 446 m s.m. Au voisinage immédiat de la prise d'eau, un léger abaissement du plan d'eau est observé, dû au soutirage. L'étude des écoulements d'approche à l'aide de la méthode LSPIV a permis de reproduire le champ des vitesses superficielles dans la retenue (Figure 6a).

Lorsque la prise d'eau est en exploitation, les masses d'eau au-dessus de l'ouvrage se mettent en rotation et conduisent à la formation de vortex, uniquement détectable dans le modèle physique et sur prototype. Ceux-ci ne sont pas préjudiciables au bon fonctionnement de la prise car ils ne génèrent pas de noyau suffisamment fort pour aspirer de l'air vers la conduite.

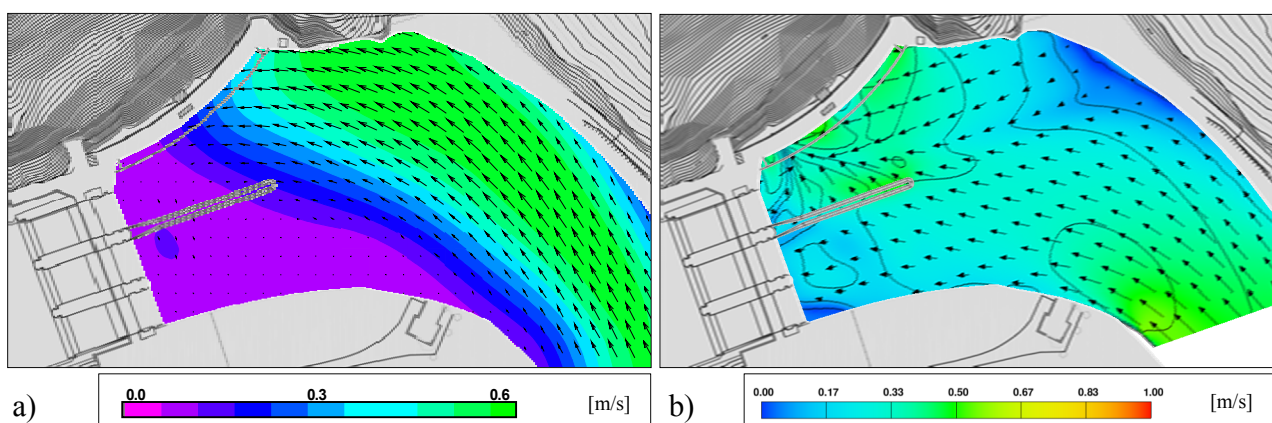


Figure 6: Ecoulement superficiel d'approche pour $Q_{\text{Rhône}} = Q_{\text{prise}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$; résultat de la modélisation a) physique mesurée avec LSPIV et b) numérique avec *FLOW3D*®

L'écoulement d'approche simulé par *FLOW3D*® est présenté dans le plan horizontal à 445.75 m s.m. (Figure 6b). L'écoulement en surface est bien réparti sur toute la largeur du Rhône et dirigé plutôt vers la trompe aval. Contrairement au modèle physique, l'écoulement à l'intérieur de la courbe est confiné par le mur guideau derrière lequel une zone stagnante s'installe. A l'amont de la passe 3, une petite zone de recirculation apparaît juste devant le portail aval de la prise d'eau où des faibles vitesses sont identifiées.

VI.2 Essais de charriage

Un essai d'alluvionnement réalisé sur le modèle physique a permis la reconstitution de la bathymétrie mesurée sur prototype avant l'opération de purge réalisée en 2005 (Figure 7b). Après une phase de remplissage par charriage à débit constant de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ sur modèle physique, une série d'événements de crue (600 et $800 \text{ m}^3/\text{s}$) a été simulée pour dynamiser le transport sédimentaire (Figure 7a). Des mesures bathymétriques à l'aide d'un Mini Echo Sounder (UWS) ont permis de suivre l'évolution du lit pendant les essais et de reconstituer la géométrie finale des dépôts. Cet essai a été interrompu lorsque le volume d'alluvionnement du modèle correspondait à celui mesuré in situ. Les niveaux et la forme des dépôts ont pu être reproduits conformément à la réalité, en respectant les conditions d'exploitation du barrage. Cette bathymétrie, caractérisée par un dépôt important à l'intérieur du coude et un chenal prononcé en rive droite, a été utilisée comme condition initiale pour l'opération de purge et la mesure de son efficacité.

La simulation préalable par l'outil informatique *CCHE 2D* a fourni une bathymétrie au bout de 30 jours de temps simulé en mode d'exploitation en partant d'un fond initial trapézoïdal (Figure 7a). Cette géométrie à deux chenaux, un vers la passe 2 et un à l'extérieur de la courbe, est significativement différente de celle mesurée sur modèle physique. Les dépôts en rive gauche sont par contre également détectés.

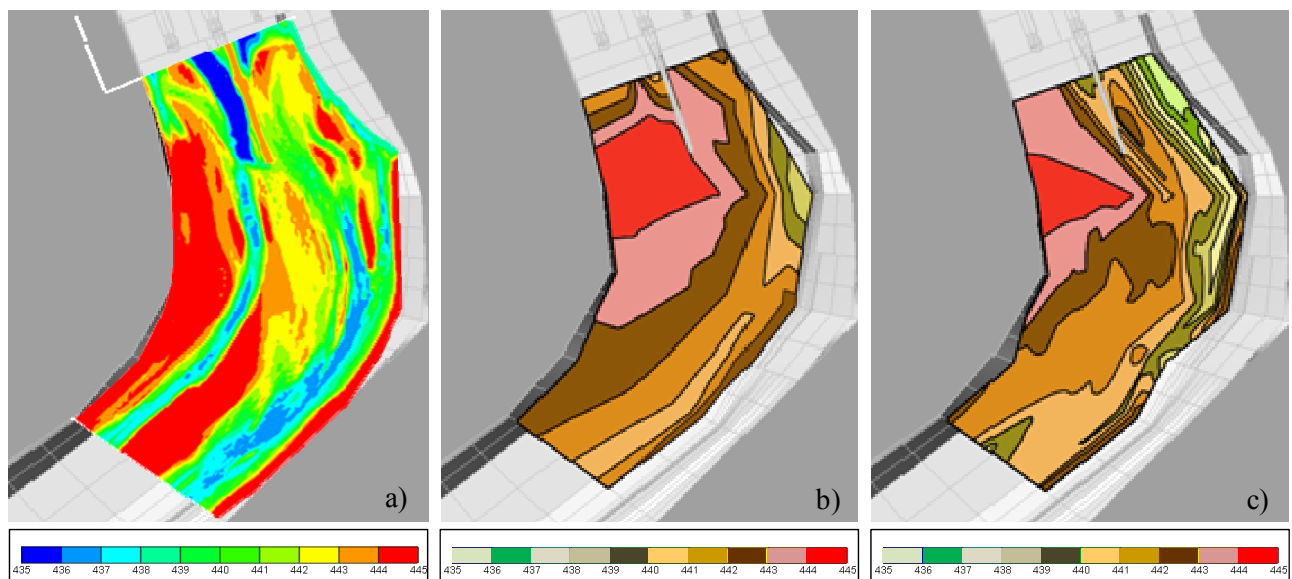


Figure 7: Bathymétrie [m s.m.] avant purge a) simulée avec *CCHE 2D*, b) mesurée sur prototype et c) mesurée sur modèle physique

VIICONCLUSIONS

Le modèle physique de la retenue de Lavey sur le Rhône en Suisse a été réalisé dans le but de tester et d'optimiser un aménagement susceptible de maîtriser la gestion sédimentaire sur le site. Une phase expérimentale préliminaire a été consacrée au calage et à la validation du modèle, en comparaison des observations et mesures effectuées in situ. Cette étape avait également pour but de documenter un état de référence concernant l'alluvionnement, les opérations de purge, la gestion des crues et l'alimentation de la prise d'eau.

Les champs de vitesse sous différentes conditions d'exploitation ont été préalablement évalués par le logiciel *Dunamic 2D*. La simulation du transport solide dans le secteur du barrage à l'aide du code numérique *CCHE 2D* a permis l'étude préliminaire de l'impact du réaménagement de la zone. En raison de la complexité des écoulements à l'approche de la prise d'eau, la simulation numérique tridimensionnelle avec *FLOW3D*[®] s'est imposée pour l'étude comparative de variantes d'aménagement.

A l'origine, le choix du modèle physique était justifié par la complexité des phénomènes bi-phasiques et tridimensionnels concernés. A titre comparatif, la modélisation numérique des écoulements et du transport solide a livré des résultats globalement similaires mais parfois différents localement. L'approche numérique se révèle particulièrement intéressante pour la documentation des écoulements d'approche à large échelle et pour l'étude préalable de variantes d'aménagement. Les situations avec transport sédimentaire n'ont par contre pas pu être reproduites numériquement en raison de la complexité des processus transitoires et surtout

des temps de calcul requis. L'approche numérique à degré de complexité croissant est particulièrement intéressante pour la documentation des écoulements à large échelle et pour l'étude préalable de variantes d'aménagement. La présence d'une multitude de facteurs ne permet cependant pas de renoncer au modèle physique mais elle contribue à l'exploiter d'une manière efficace. La simulation du transport sédimentaire confirme cependant l'avantage de la modélisation physique.

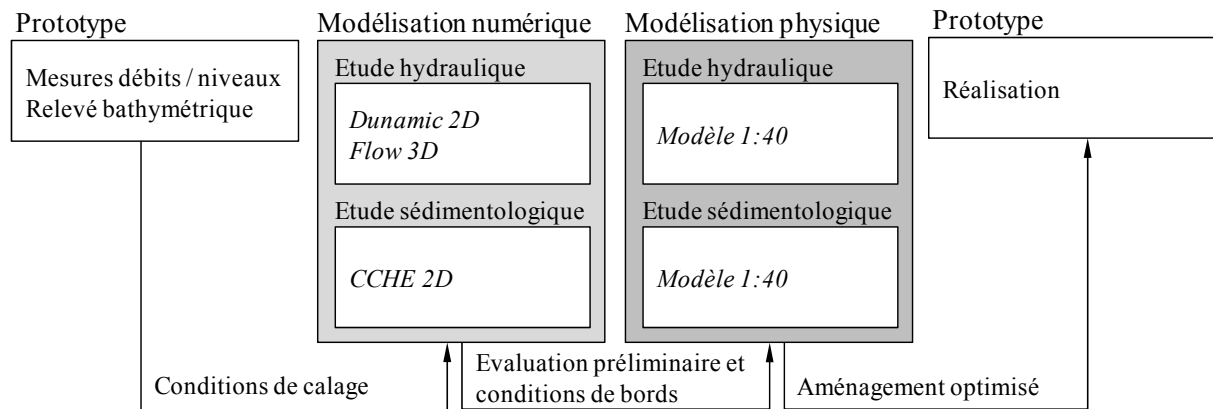


Figure 8: Approche hybride choisie pour l'étude de l'aménagement hydroélectrique de Lavey

Les solutions d'aménagement proposées par le groupement d'ingénieurs sur la base d'une évaluation interne par des modèles numériques 2D ont pu être testées sur modèle numérique 3D et optimisées sur le modèle physique (Figure 8).

VIII REFERENCES ET CITATIONS

- [1] Bieri, M., Jenzer, J., Kantoush, S.A., & Boillat, J.-L. (2009). – Large Scale Particle Image Velocimetry Applications for Complex Free Surface Flows in River and Dam Engineering. *33rd IAHR 2009 Congress*. Vancouver, Canada.
- [2] Groupement Stucky-Hydrocosmos-BG (2005). – *Etude hydraulique bidimensionnelle du Rhône au voisinage du barrage de Lavey – Rapport intermédiaire*. Rapport interne.
- [3] Groupement Stucky-Hydrocosmos-BG (2007). – *Etude hydraulique bidimensionnelle du Rhône au voisinage du barrage de Lavey – Analyse du transport solide à l'échelle du barrage*. Rapport interne.
- [4] Kantoush, S.A., Bollaert, E., & Schleiss, A.J. (2008). – Experimental and numerical modeling of sedimentation in a rectangular shallow basin. *International Journal Sediment Research*, **23**: 112-132.
- [5] Kantoush, S.A., De Cesare, G., Boillat, J.-L., & Schleiss, A.J. (2008). – Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modeling. *Flow Measurement and Instrumentation*, **19**: 139-144.
- [6] LCH (2008). – Barrage de Lavey – Etude des écoulements et du transport solide dans le Rhône – Phase I – Etat initial et état actuel. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [7] Müller, M., Bieri, M., Ribeiro Martins, J., Boillat, J.-L. & Schleiss, A.J. (2009). – Barrage de Lavey – Etudes physique et numérique des écoulements et du transport solide dans le Rhône. *Colloque SHF: «Modèles physiques hydrauliques»*. Lyon, France.
- [8] Ribeiro, J.M. (2009). – Physical and 3D numerical modeling of the water intakes of the Lavey hydroelectric power plant under steady flow conditions. *MAS practical research project*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [9] Teklemariam, E., Korbaylo, B.W., Groeneveld, J.L. & Fuchs, D.M. (2002). – Computational Fluid Dynamics : Diverse Applications in Hydropower Project's Design and Analysis. *CWRA 55th Annual Conference*. Winnipeg, Canada.